

古在共鳴 — 20 世紀を代表する論文として

木下 宙

〈国立天文台位置天文・天体力学研究系 天体力学研究部門 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: Hiroshi.Kinoshita@nao.ac.jp

古在由秀氏が 1962 年に Astron. J. (以後 AJ と略す) に発表した論文 "Secular Perturbations of Asteroids with High Inclination and Eccentricity" (AJ, 67, 591-598, 1962) が, 1900 年代に AJ と Astrophysical J. (以後 ApJ と略す) に掲載された最も基本的な論文 53 のひとつとして選ばれた。ここで基本論文選考と古在氏の上記論文の簡単な紹介をする。

上記に述べた 53 論文は, ApJ の特集号 (Vol.525, No.1C, part 3) として出版されている。1243 ページに及ぶ大部なもので, 各論文には関連研究者による解説が付いている。アメリカ天文学会より送料込みで 45 ドルで購入できる。これら基本的論文の選考過程については ApJ の編集長である Abt 氏の上記特集号の巻頭記事に詳しく述べられているので, ここでは概略について述べる。AJ は 1849 年, ApJ は 1895 年に創刊され, 現在では両誌ともアメリカ天文学会から編集発行されている。21 世紀を迎えるにあたってアメリカ天文学会のもとに, Osterbrook を委員長とする 100 年記念委員会が作られた。この委員会が 50 名の天文学者 ("experienced and expert astronomers"と書かれているだけで選考委員名は公表されていない) に, 1900 年代に AJ と ApJ に発表された論文から基本的な論文をコメントつきで推薦してもらい, そのなかから 53 論文を選定した。最初の論文は A. Schuster の "Radiation through a Foggy Atmosphere" (ApJ, 21, 1, 1905) であり, 最近の論文は B. M. Lasker et al. の "The Guide Star Catalog. I. Astronomical Foundation and Image Processing" (AJ, 99, 2019, 1990) である。10 年ごとに区切った選定された論文の分布は次の表の通りである。

1900-1909	: 2
1910 年代	: 2
1920 年代	: 2
1930 年代	: 4
1940 年代	: 4
1950 年代	: 19
1960 年代	: 13
1970 年代	: 5
1980 年代	: 1
1990 年代	: 1

一人で複数の論文 (筆頭著者論文) が選定されたのは Chandrasekhar (3 論文), Hoyle (3 論文), Hubble (2 論文) である。選定された 53 論文のうち 49 論文は ApJ より, 4 論文は AJ からのものである。このことから選定委員にか

なりの偏りがあることがわかる。

小惑星は木星の摂動を強く受けている。摂動を受けると 2 体問題では定点であった近点と昇交点が回転する。しかしある条件の下では近点が回転せずにある点の周りを振動する (このことを秤動という)。古在氏は軌道傾斜角が大きな小惑星の近点引数 (昇交点から近点までの角度) が 90 度または 270 度の周りを秤動する事を見出し, それを理論的に説明した。この研究論文が上記の 1900 年代の基本的な論文のひとつとして選ばれたのである。ここで少し専門的すぎるかもしれないが簡単に論文の内容を紹介する。

巨大惑星である木星の影響下での小惑星の運動を考える。小惑星の質量は木星に較べて小さいので, 小惑星の運動は木星の運動を乱さないとする。このような近似での 3 体問題を制限 3 体問題という。

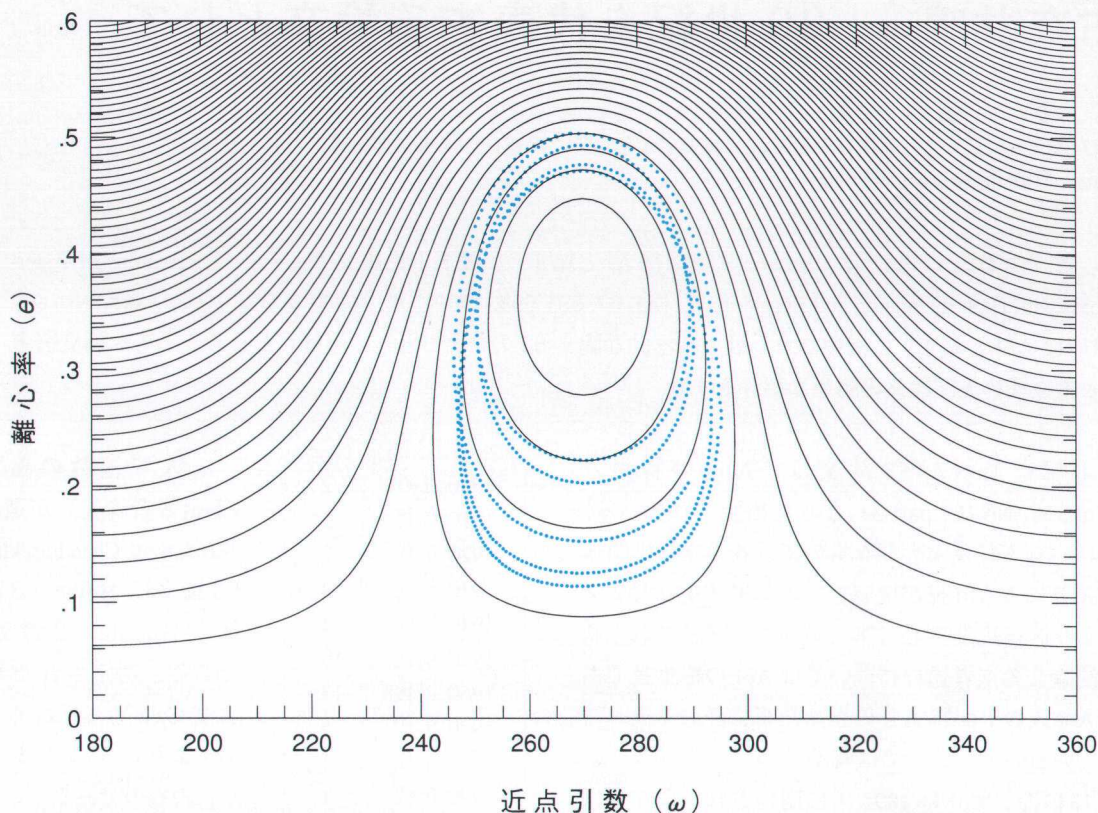


図1 古在共鳴にある小惑星 Kozai (3040) に対応する等ハミルトニアン曲線群. 横軸は近点引数(度), 縦軸は離心率. 点線は9惑星の摂動をうけている Kozai (3040) の運動を数値積分で200000年間追跡した結果. (国立天文台の中井 宏氏提供).

したがって系の自由度は3である. 長期の小惑星の挙動を調べるには小惑星の公転周期(数年), 木星の公転周期(12年)は短周期と見なしこれらの周期で系のハミルトニアンを平均して短周期項を消去する. まず小惑星の公転周期で平均すると角変数の一つである平均近点離角がハミルトニアンからなくなり, 小惑星の軌道長半径が一定となる. さらに木星の公転周期で平均すると, 木星による摂動はリングポテンシャルと等価, すなわち軸対称となるので小惑星の角運動量のz成分は保存される. また摂動ポテンシャルが軸対称とすることからハミルトニアンの中から角変数の一つである昇交点

経度がなくなりハミルトニアンの中に残った角変数は近点引数だけであり, 系の自由度は1となり, 系の運動は積分可能となる. しかしハミルトニアン自身が保存量なので運動方程式を解かなくても, 等ハミルトニアン曲線を描くことによって運動の大局的な挙動はわかる. 軌道長半径が一定ということと角運動量のz成分が保存されることを使うと離心率(e)と軌道傾斜角(I)の間には

$$(1-e^2)\cos^2 I = h \tag{1}$$

なる関係がある. 横軸に近点引数(ω), 縦軸に離

心率 (e) をとって、この面内で等ハミルトニアン曲線を描く (図 1 参照)。曲線群の様相は積分定数の h に依存する。図 1 での $h = 0.49$ は小惑星 Kozai (3040) の値を採用した。図 1 の場合、近点引数が回転する領域と秤動する二つの領域があり、境界付近の軌道の離心率は大きく長周期で変動する。 h の値が 0.6 より小さいと秤動領域は現れず、離心率の変動は小さい。離心率の変動がわかれば (1) の関係式より軌道傾斜角の変動もわかる。いつ頃かは定かではないが近点引数が 90 度または 270 度のまわりを秤動する現象が古在共鳴と呼ばれるようになった。古在氏はこの論文で離心率をワイヤーシュトラウスのペー関数で表現したが、論文中で諸量の数値的評価には応用しなかった。後に木下・中井^{1), 2)} は古在共鳴解を楕円関数を用いてより利用しやすい形にし、天王星の衛星運動、海王星の衛星運動に適用した。

古在論文 (1962) では摂動天体が摂動を受ける天体の外側にあり、かつ平均運動共鳴にない場合を議論した。このうち他のケースにも拡張されていた。平均運動共鳴にあつては古在共鳴にあるケースについては古在氏が研究の端緒を開いた。また摂動天体が被摂動天体の内側にある場合、軌道が摂動天体と交差する場合などへと拡張されて

行った。冥王星は海王星との 2:3 平均運動共鳴にありかつ古在共鳴にもあり、古在共鳴が冥王星の長期軌道安定性に寄与している。古在共鳴は小惑星の長期軌道の研究ばかりでなく、彗星の長期の軌道進化でも重要な働きをしていることがわかってきた。また最近続々と発見されている太陽系外惑星には離心率がかなり大きなものが数多くある (16 Cyg の惑星の離心率は 0.65)。このように惑星の離心率を大きくする力学的メカニズムとして古在共鳴が関連している立場からの研究がなされている。このように古在共鳴はアストロダイナミクス (Astrodynamics) において長期の軌道変動を研究する際の基本的な力学メカニズムのひとつである。

参考文献

- 1) Kinoshita H., Nakai H., 1991, Secular Perturbations of Fictitious Satellites of Uranus, *Celest. Mech. & Dyn. Astr.*, 52, 293-303
- 2) Kinoshita H., Nakai H., 1999, Analytical Solution of Kozai Mechanism and its Application to Dynamical Astronomy, *Celest. Mech. & Dyn. Astr.*, 75, 125-147